



杨旭珍, 颜建明, 张婧, 等. 叶面喷施  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  对娃娃菜 NaCl 胁迫的缓解效应[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(4): 856–866.

YANG X Z, XIE J M, ZHANG J, et al. Alleviation effect of foliar spraying  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  on NaCl stress of Mini Chinese Cabbage[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(4): 856–866.

# 叶面喷施 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 对娃娃菜 NaCl 胁迫的缓解效应

杨旭珍, 颜建明\*, 张婧\*, 张雅茹

(甘肃农业大学 园艺学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**【目的】旨在探究纳米氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ )对娃娃菜盐胁迫的缓解效应。【方法】以“皇妃”娃娃菜为试验材料, 喷施超纯水为对照, 在 150 mmol/L NaCl 胁迫下叶面喷施不同质量浓度  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  (0, 25, 50, 100, 200, 400, 500 mg/L)。【结果】NaCl 胁迫通过影响娃娃菜根系生长、叶细胞膜脂过氧化、抗氧化酶活性, 以及 AsA-GSH 循环抑制植株生长。喷施不同质量浓度的  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  均能够促进娃娃菜根系生长, 提高叶片谷胱甘肽还原酶(GR)、脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)及抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性、抗氧化剂 GSH 含量及 GSH/GSSG 比值, 降低过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )、超氧阴离子( $\text{O}_2^-$ )、丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)含量及相对电导率(REC), 有效缓解 NaCl 胁迫对娃娃菜幼苗生长的抑制作用。500 mg/L 的  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  能够显著提高盐胁迫下娃娃菜植株总根长、根体积、根尖数以及根表面积, 分别提高 55.66%、56.33%、68.49% 和 57.61%; 显著降低叶片中  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{O}_2^-$ 、MDA、Pro 含量, 分别降低 48.77%、42.50%、23.68%、47.53%; 显著增强 GR、DHAR、APX 活性, 提高 GSH 含量和 GSH/GSSG 比值, 分别增加 16.39%、18.66%、56.64% 和 35.41%、60.26%。【结论】150 mmol/L NaCl 胁迫对娃娃菜幼苗的生长具有明显的负效应, 外源喷施不同质量浓度(25–500 mg/L)的  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  均能够有效缓解 NaCl 胁迫的抑制作用, 试验条件下 500 mg/L 的  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  的缓解效果最优。

**关键词:** 娃娃菜; NaCl 胁迫;  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ ; 膜脂过氧化; ASA-GSH 循环

中图分类号: S634.3 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2024)04-0856-11



## Alleviation effect of foliar spraying $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ on NaCl stress of Mini Chinese Cabbage

YANG Xuzhen, XIE Jianming\*, ZHANG Jing\*, ZHANG Yaru

(College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** [Objective] The aim is to explore the alleviation effect of nano-iron oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ ) on salt stress of Mini Chinese Cabbage. [Method] With ‘Huangfei’ Mini Chinese Cabbage as the test material and

收稿日期: 2024-01-22 修回日期: 2024-03-04

基金项目: 甘肃省科技计划资助项目(23CXNA0037、21JR7RA821)

Project supported by the Gansu Provincial Science and Technology Plan Funding Project(23CXNA0037, 21JR7RA821)

作者简介: 杨旭珍, 硕士生, orcid.org/0009-0003-4602-0197, 294926050132@qq.com; \*通信作者: 颜建明, 教授, 博士生导师, 主要从事蔬菜栽培与生理生态和设施设计与环境调控研究, orcid.org/0000-0002-9882-2074, xiejianming@gsau.edu.cn; 张婧, 博士, 主要从事蔬菜栽培与生理生态研究, orcid.org/0000-0003-4016-1346, zj@gsau.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

ultrapure water as the control, different concentrations of  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  (0, 25, 50, 100, 200, 400, 500 mg/L) were sprayed on the leaves under 150 mmol/L  $\text{NaCl}$  stress. [Result]  $\text{NaCl}$  stress inhibited plant growth by affecting Mini Chinese Cabbage root growth, leaf cell membrane lipid peroxidation, antioxidant enzyme activities, and the AsA-GSH cycle. Spraying different concentrations of  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  promoted root growth, increased leaf glutathione reductase (GR), dehydroascorbate reductase (DHAR), ascorbate peroxidase (APX) activities, antioxidant GSH content and GSH/GSSG ratio, and reduced hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), superoxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), superoxide anion ( $\text{O}_2^-$ ), malondialdehyde (MDA), proline (Pro) content and relative electrical conductivity (REC). The spraying effectively mitigated the inhibitory effect of  $\text{NaCl}$  stress on the growth of Mini Chinese Cabbage seedlings.  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  at 500 mg/L significantly increased total root length, root volume, root tip number and root surface area of Mini Chinese Cabbage plants under salt stress by 55.66%, 56.33%, 68.49% and 57.61%, respectively; it significantly reduced the  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2^-$ , MDA and Pro contents in leaves by 48.77%, 42.50%, 23.68%, and 47.53%, respectively; it significantly enhanced GR, DHAR, and APX activities, and increased GSH content and GSH/GSSG ratio by 16.39%, 18.66%, 56.64%, and 35.41% and 60.26%, respectively. [Conclusion] 150 mmol/L  $\text{NaCl}$  stress had a significant negative effect on the growth of Mini Chinese Cabbage seedlings, and exogenous sprays of  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  at different concentrations (25–500 mg/L) were able to effectively alleviate the inhibitory effect of  $\text{NaCl}$  stress; the alleviating effect of 500 mg/L  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  was optimal under the experimental conditions.

**Keywords:** Mini Chinese Cabbage;  $\text{NaCl}$  stress;  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ ; membrane lipid peroxidation; AsA-GSH cycle

【研究意义】土壤盐渍化作为世界各国重点关注的环境和生态问题之一,已经成为限制农业生产的重要因素。除自然因素外,种植者为了追求高产,盲目施肥以及不合理的灌溉,导致土壤盐渍化问题愈加严重,对农业生产造成不利影响<sup>[1]</sup>。因此,盐渍土地的开发和利用,对于农业生产和土地的可持续发展具有重大意义<sup>[2]</sup>。【前人研究进展】盐渍土地通常是由于高浓度的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 在土壤溶液中积累,产生高渗和高离子条件,从而阻碍植物从土壤中吸收水分和养分<sup>[3]</sup>。已有研究<sup>[4-5]</sup>证实,盐胁迫导致植株矮小,叶片变厚、黄化、脱落,造成细胞质膜和叶绿体损伤,活性氧过量积累,光合作用降低,光合产物减少,严重抑制植株生长。Wang等<sup>[6]</sup>研究发现,100~400 mmol/L  $\text{NaCl}$ 处理对小白菜种子萌发、幼苗生长及叶球形成具有负面影响。 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 是一种金属纳米材料,凭借其良好的光学性质、磁性能以及催化性能,在医学诊断、药物释放控制、分离技术以及水污染治理等领域均得到广泛应用<sup>[7-8]</sup>。近年来, $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 在农业领域应用中也具备其独有的优势<sup>[9-10]</sup>。与传统螯合铁肥EDTA-Fe相比, $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 能有效提高植株光合作用、促进植物生长、提高种子活力、增加玉米和水稻籽粒产量等<sup>[11]</sup>。Ren等<sup>[12]</sup>研究发现,在添加 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 后,绿豆种子的萌发率以及根系活力显著提高。Jeyasubramanian等<sup>[13]</sup>在水培菠菜的研究中表明, $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 显著促进了菠菜茎长和根长。Rizwan等<sup>[14]</sup>研究表明,适宜质量浓度的 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 能够增加植株体内抗氧化剂含量,增强抗氧化酶的活性,提高植物抵抗逆境的能力。

【本研究切入点】目前,对于 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 的研究主要集中在其对重金属镉以及盐胁迫下小麦、大豆等的抗氧化能力的影响上<sup>[14]</sup>,有关 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 的应用对十字花科植物抗盐能力的相关研究较少。【拟解决的关键问题】试验通过对盐胁迫下娃娃菜幼苗叶面喷施不同质量浓度的纳米 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ ,探究其对 $\text{NaCl}$ 胁迫下娃娃菜幼苗膜脂过氧化及ASA-GSH循环系统的影响,以期对盐碱地娃娃菜高效栽培提供新的途径与方法。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试娃娃菜品种为“皇妃”,由北京四海种业有限责任公司生产。该品种为中早熟杂交种,不易抽薹,耐寒性较强,高寒地区可夏季栽培,为生产中广泛应用的品种之一。 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 平均粒径为20 nm,比表面积85%,纯度99%。

## 1.2 试验设计

用不同质量浓度  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  溶液浸种 8 h, 然后在培养皿中铺两层滤纸于人工气候箱内黑暗条件下 ( $25 \pm 1$ ) $^\circ\text{C}$  催芽 12 h, 选取发芽一致的种子播种在进行了盐化处理 (150 mmol/L NaCl) 的基质中, 20 d 后喷施不同质量浓度  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  (25, 50, 100, 200, 400, 500 mg/L)。试验共 8 个处理 (表 1), 分别为正常生长 ( $\text{CK}_1$ )、盐胁迫处理 ( $\text{CK}_2$ )、不同质量浓度  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  对盐胁迫娃娃菜幼苗的缓解处理 ( $\text{T}_1 \sim \text{T}_6$ )。每个处理 20 株, 3 次重复, 08:00—10:00 用  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  喷施至叶面湿润不滴水, 7 d 后取样测定指标。

试验于 2023 年 3 月至 2023 年 10 月在甘肃农业大学园艺学院植物培养室中进行。试验所用基质先用 150 mmol/L 的 NaCl 溶液进行盐化处理, 基质与 NaCl 溶液 ( $w/V$ ) 比为 4:1。昼/夜温度  $20\text{ }^\circ\text{C}/18\text{ }^\circ\text{C}$ , 光强  $169.87\text{ }\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 光照时间 12 h, 相对湿度 70%。

$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  溶液配制: 配制 500 mg/L  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  溶液作为母液, 使用前超声 30 min, 之后将 500 mg/L  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  溶液稀释至所需浓度。

表 1 试验处理设置

Tab.1 Experimental treatments

处理	NaCl/(mmol·L <sup>-1</sup> )	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> NPs/(mg·L <sup>-1</sup> )
CK <sub>1</sub>	0	0
CK <sub>2</sub>	150	0
T <sub>1</sub>	150	25
T <sub>2</sub>	150	50
T <sub>3</sub>	150	100
T <sub>4</sub>	150	200
T <sub>5</sub>	150	400
T <sub>6</sub>	150	500

## 1.3 测定指标和方法

### 1.3.1 根系形态扫描

将娃娃菜幼苗根系洗净后放置于扫描盘中, 使根系在水中均匀展开, 用根系扫描仪 (STD 4800, 加拿大) 扫描根系形态, 用 WinRHIZO 5.0 软件分析总根长、根表面积、根体积和根尖数。

### 1.3.2 丙二醛 (MDA)、脯氨酸 (Pro) 含量及相对电导率 (REC) 的测定

MDA 含量采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法测定<sup>[15]</sup>, Pro 含量采用酸性茚三酮比色法测定<sup>[16]</sup>, REC 采用抽气法测定<sup>[17]</sup>, 用 DDSJ—308F 型电导率仪测定值。

### 1.3.3 过氧化氢 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、超氧阴离子 (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) 含量测定及定性分析

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 含量按照高俊凤<sup>[18]</sup> 的方法测定。H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 分析分别采用 3, 3-二氨基联苯胺 (DAB) 和硝基氮蓝四唑 (NBT) 进行组织化学染色<sup>[19]</sup>。

### 1.3.4 抗氧化酶活性的测定

超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 活性分别采用氮蓝四唑 (NBT) 法和愈创木酚法测定<sup>[20]</sup>; 过氧化氢酶 (CAT) 活性采用试剂盒测定。

### 1.3.5 ASA-GSH 循环相关抗氧化酶活性和相关抗氧化剂含量的测定

按照程玉静等<sup>[21]</sup> 的方法测定抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性。脱氢抗坏血酸还原酶 (DHAR)、谷胱甘肽还原酶 (GR)、单脱氢抗坏血酸还原酶 (MDHAR) 活性采用试剂盒测定。抗坏血酸 (ASA) 含量采用 2, 6-二氯酚靛酚法测定<sup>[22]</sup>; 还原型谷胱甘肽 (GSH)、脱氢抗坏血酸 (DHA)、氧化型谷胱甘肽 (GSSG) 含量采用试剂盒测定。试验所用试剂盒均购自苏州科铭生物技术有限公司。每个指标测定均 3 次重复。

## 1.4 数据分析

用 Excel 2019 软件进行试验数据录入、处理并作图, 用 SPSS 26.0 软件进行数据分析, 按照 Duncan's 法进行多重比较,  $P < 0.05$  为差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 对盐胁迫下娃娃菜幼苗根系形态的影响

$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  对 NaCl 胁迫下娃娃菜幼苗根系形态的影响见图 1。与  $\text{CK}_1$  相比, 150 mmol/L NaCl 处理明显抑制了娃娃菜根系生长, 外源喷施  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  缓解了 NaCl 胁迫对根系形态和结构的抑制作用。

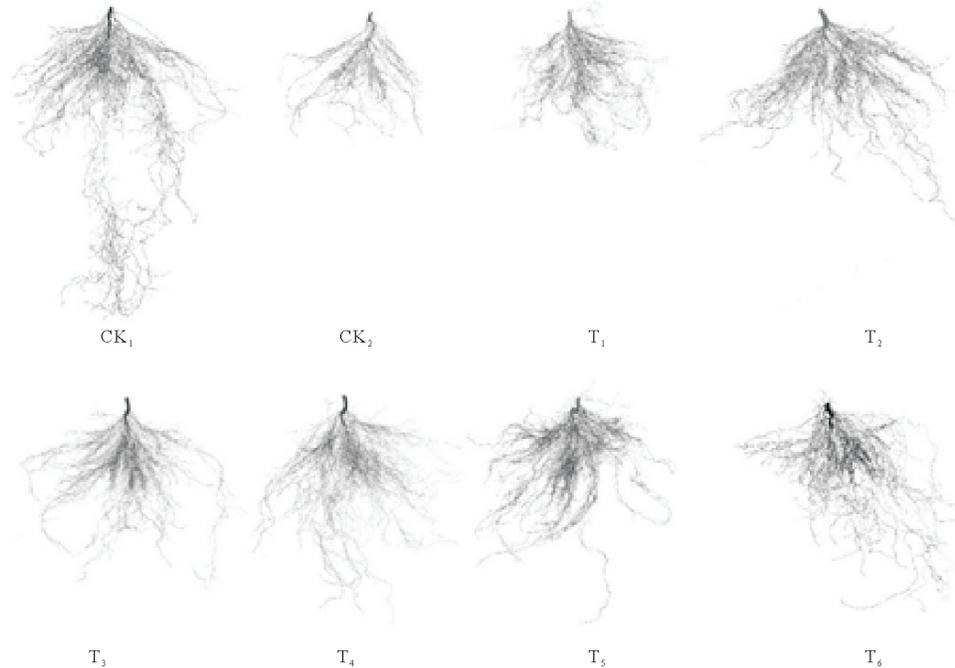


图1 不同质量浓度  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  对盐胁迫下娃娃菜幼苗根系形态的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  on root morpho of Mini Chinese Cabbage seedling root under salt stress

### 2.2 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 对盐胁迫下娃娃菜幼苗根系形态参数的影响

不同质量浓度  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  对 NaCl 胁迫下娃娃菜幼苗根系形态参数的影响见表 2。与  $\text{CK}_1$  相比, NaCl 处理娃娃菜的总根长、总根表面积、根尖数和总根体积均显著降低, 分别降低 61.20%、61.88%、74.85% 和 61.11%。叶面喷施不同质量浓度的  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  均能显著提高 NaCl 胁迫下娃娃菜幼苗的总根长、根体积、根尖数及根表面积; 其中  $\text{T}_6$  处理效果最为明显, 总根长、根体积、根尖数, 以及根表面积较  $\text{CK}_2$  分别增加 55.66%、56.33%、68.49% 和 57.61%。

表 2 不同质量浓度  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  处理对盐胁迫下娃娃菜幼苗根系形态参数的影响

Tab.2 Effects of  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$  with different concentrations on morphological parameters of Mini Chinese Cabbage seedling roots under salt stress

处理 Treatments	总根长/cm Total root length	根表面积/cm <sup>2</sup> Total root surface area	根体积/cm <sup>3</sup> Total root volume	根尖数 The number of root tips
$\text{CK}_1$	847.01±70.29 <sup>a</sup>	75.06±6.24 <sup>a</sup>	0.53±0.044 <sup>a</sup>	1942.00±112.66 <sup>a</sup>
$\text{CK}_2$	328.67±28.78 <sup>e</sup>	28.61±5.63 <sup>c</sup>	0.21±0.081 <sup>d</sup>	481.67±22.25 <sup>f</sup>
$\text{T}_1$	457.28±28.20 <sup>f</sup>	42.78±2.23 <sup>d</sup>	0.32±0.017 <sup>e</sup>	741.67±2.49 <sup>e</sup>
$\text{T}_2$	554.15±12.40 <sup>c</sup>	52.77±1.60 <sup>c</sup>	0.40±0.032 <sup>bc</sup>	859.33±37.03 <sup>de</sup>
$\text{T}_3$	605.75±17.33 <sup>de</sup>	57.44±2.44 <sup>bc</sup>	0.43±0.025 <sup>abc</sup>	926.33±10.21 <sup>de</sup>
$\text{T}_4$	651.87±14.04 <sup>cd</sup>	61.33±2.97 <sup>b</sup>	0.46±0.036 <sup>ab</sup>	1035.00±41.30 <sup>d</sup>
$\text{T}_5$	683.19±2.73 <sup>bc</sup>	63.61±3.08 <sup>b</sup>	0.49±0.099 <sup>ab</sup>	1246.00±116.68 <sup>c</sup>
$\text{T}_6$	741.20±10.63 <sup>b</sup>	65.51±2.94 <sup>b</sup>	0.49±0.017 <sup>ab</sup>	1550.00±100.24 <sup>b</sup>

同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Different lowercase letters in the same column indicate a significant difference at the 0.05 level.

### 2.3 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs对盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片REC和MDA的影响

不同处理娃娃菜的REC值和MDA含量的积累见图2A和图2B。与CK<sub>1</sub>相比,NaCl处理显著提高了娃娃菜幼苗叶片REC值和MDA含量,分别提高了37.87%和33.44%。外源喷施不同质量浓度的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs,可显著降低NaCl胁迫处理下娃娃菜幼苗叶片REC,T<sub>1</sub>~T<sub>6</sub>处理的REC值较CK<sub>2</sub>依次降低了18.77%、23.88%、27.01%、31.63%、32.28%、33.05%。不同质量浓度Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs处理能够降低娃娃菜幼苗叶片MDA的含量,T<sub>1</sub>~T<sub>6</sub>处理的MDA含量较CK<sub>2</sub>分别降低了8.97%、15.37%、20.20%、22.97%、28.72%、28.56%。

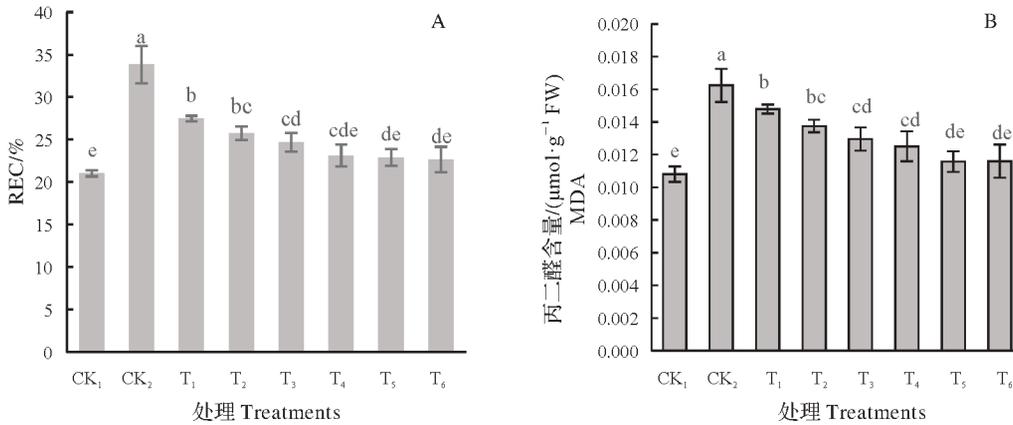


图2 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs对盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片REC和MDA的影响

Fig.2 Effect of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs on REC and MDA in Mini Chinese Cabbage seedling leaves under salt stress

### 2.4 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs对盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片O<sub>2</sub><sup>-</sup>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、Pro含量的影响

图3A和图3B为Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs对盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片中O<sub>2</sub><sup>-</sup>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的影响。与CK<sub>1</sub>相比,NaCl处理显著增加了娃娃菜幼苗叶片内O<sub>2</sub><sup>-</sup>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量,分别增加82.34%、54.30%。喷施不同质量浓度的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs均显著降低了盐胁迫下叶片O<sub>2</sub><sup>-</sup>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量;O<sub>2</sub><sup>-</sup>含量随着Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs质量浓度的增加呈现降低趋势,其中T<sub>6</sub>处理降幅最为明显,较CK<sub>2</sub>降低了42.50%;H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量随着Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs质量浓度的增加显著降低,T<sub>1</sub>~T<sub>6</sub>处理较CK<sub>2</sub>依次降低了26.36%、29.91%、30.84%、38.81%、42.79%、48.77%。

图3C为不同质量浓度Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs对NaCl胁迫下娃娃菜幼苗叶片Pro含量的影响。与CK<sub>1</sub>相比,NaCl处理显著增加了娃娃菜叶片的Pro含量,增加了34.56%。与CK<sub>2</sub>相比,叶面喷施不同质量浓度的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs后Pro含量均显著降低,降幅为31.8%~47.53%。

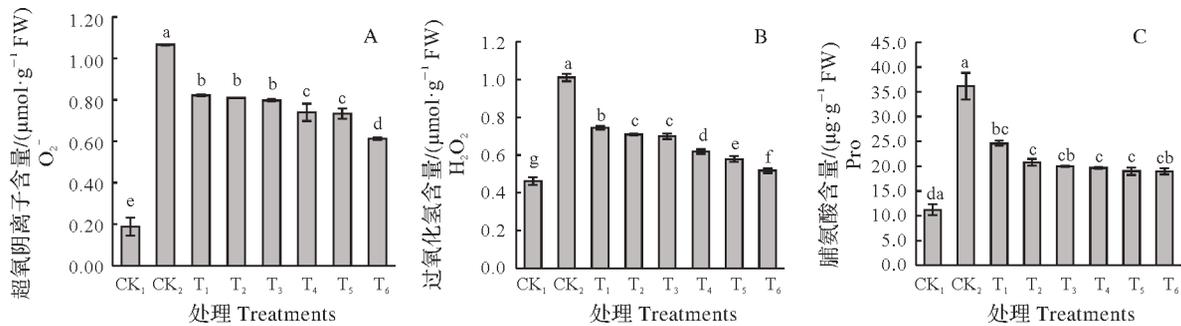


图3 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片O<sub>2</sub><sup>-</sup>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和Pro的影响

Fig.3 Effect of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs on H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub><sup>-</sup> and Pro in Mini Chinese Cabbage seedling leaves under salt stress

### 2.5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs对盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片活性氧组织NBT和DAB染色的影响

采用DAB和NBT组织化学染色对娃娃菜叶片中H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和O<sub>2</sub><sup>-</sup>含量进行定性分析。NBT染色显示,NaCl胁迫下O<sub>2</sub><sup>-</sup>在叶片中大量的积累;叶面喷施不同质量浓度的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs后,叶片中积累的O<sub>2</sub><sup>-</sup>较CK<sub>2</sub>处理有一定程度的减少,T<sub>6</sub>处理减少最为明显。

DAB染色显示,NaCl胁迫娃娃菜叶片中积累大量的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>;叶面喷施不同质量浓度的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs后,显著降低了叶片H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量,T<sub>6</sub>处理降低最为明显。表明Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs处理能够清除NaCl胁迫下娃娃菜叶片积累的过量活性氧。

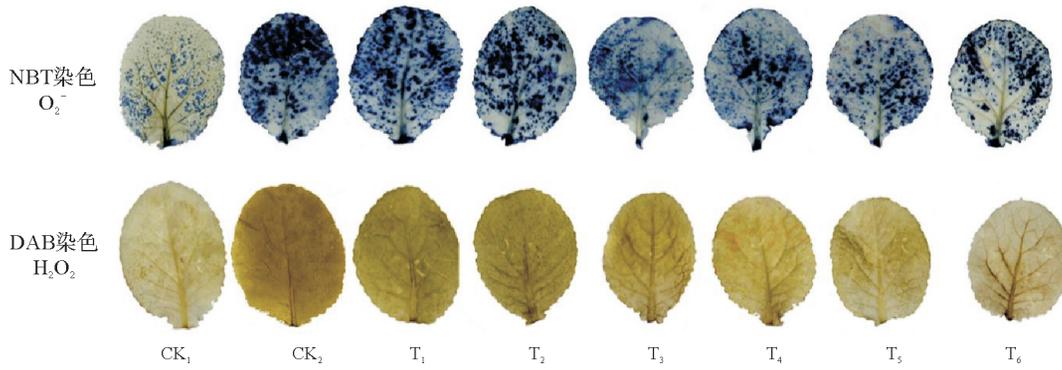


图 4 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs 对盐胁迫下娃娃菜 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的化学组织染色的影响

Fig.4 Effect of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs on chemical tissue staining for hydrogen peroxide and superoxide anions in Mini Chinese Cabbage under salt stress

### 2.6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs 对盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片 SOD、POD、CAT 酶活性的影响

图 5 为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs 对 NaCl 胁迫下娃娃菜幼苗叶片 SOD、POD、CAT 酶活性的影响。NaCl 胁迫处理后娃娃菜幼苗叶片中 SOD、POD、CAT 酶活性显著增加,分别增加了 60.17%、12.25%、17.79%。叶面喷施不同质量浓度的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs 后 SOD、POD、CAT 的活性随着 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs 质量浓度的增加而降低;与 CK<sub>2</sub> 相比,T<sub>6</sub> 处理显著降低 SOD、POD、CAT 的活性,分别降低了 56.88%、14.67%、25.66%。

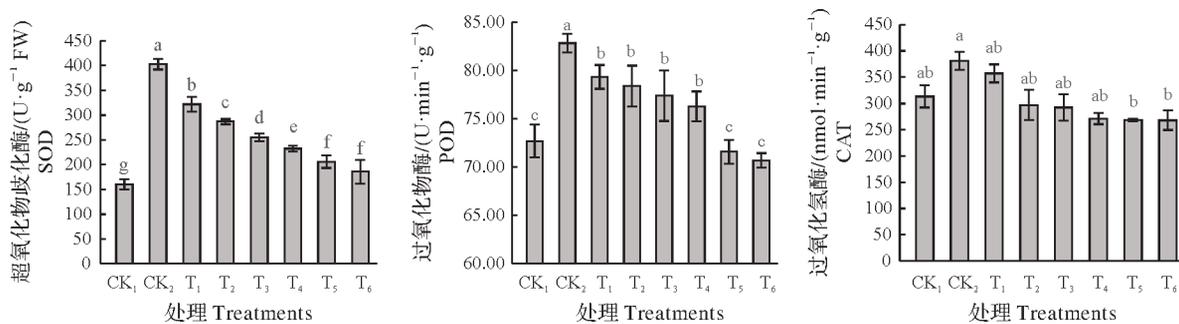


图 5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs 对盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片 SOD、POD、CAT 活性的影响

Fig.5 Effect of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs on SOD,POD,CAT in Mini Chinese Cabbage seedling leaves under salt stress

### 2.7 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs 对 NaCl 胁迫下娃娃菜幼苗叶片 AsA-GSH 循环相关物质含量的影响

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs 对 NaCl 胁迫下娃娃菜幼苗叶片 AsA-GSH 循环相关物质含量的影响见表 3。与 CK<sub>1</sub> 相比,NaCl 胁迫处理下 AsA、DHA、GSSG 含量显著增加,分别增加了 24.55%、43.07%、38.12%;GSH 含量及 GSH/GSSG 比值均显著降低,分别降低了 44.18%、66.28%。叶面喷施 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs 后,AsA、DHA、GSSG 含量较 CK<sub>2</sub> 均降低。叶片 GSH 含量及 GSH/GSSG 比值随着 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs 质量浓度的增加而增加,T<sub>6</sub> 处理分别增加了 35.41%、60.26%。

表 3 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs 对 NaCl 胁迫下娃娃菜幼苗叶片 AsA-GSH 循环相关物质含量的影响

Tab.3 Effects of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs on the contents of AsA-GSH cycling-related substances in leaves of Mini Chinese Cabbage seedlings under NaCl stress

处理 Treatments	每 100 g 抗坏血酸/mg ASA	脱氢抗坏血酸/ (nmol·g <sup>-1</sup> )DHA	氧化型谷胱甘肽/ (nmol·g <sup>-1</sup> )GSSG	还原型谷胱甘肽/ (μmol·g <sup>-1</sup> )GSH	GSH/GSSG
CK <sub>1</sub>	23.24±0.84 <sup>c</sup>	142.86±17.76 <sup>c</sup>	23.33±2.57 <sup>b</sup>	0.397±0.088 <sup>a</sup>	17.419±4.84 <sup>a</sup>
CK <sub>2</sub>	30.80±0.76 <sup>a</sup>	250.97±1.58 <sup>a</sup>	37.70±2.27 <sup>a</sup>	0.221±0.027 <sup>d</sup>	5.873±0.66 <sup>e</sup>
T <sub>1</sub>	30.18±0.05 <sup>b</sup>	238.74±16.18 <sup>a</sup>	35.63±3.53 <sup>ab</sup>	0.238±0.029 <sup>bc</sup>	6.840±1.52 <sup>e</sup>
T <sub>2</sub>	30.14±1.15 <sup>b</sup>	227.80±11.37 <sup>ab</sup>	32.06±3.87 <sup>b</sup>	0.239±0.004 <sup>cd</sup>	7.591±1.11 <sup>ede</sup>
T <sub>3</sub>	28.76±0.50 <sup>b</sup>	207.85±12.74 <sup>ab</sup>	30.77±1.45 <sup>b</sup>	0.276±0.009 <sup>abc</sup>	8.991±0.39 <sup>ede</sup>
T <sub>4</sub>	23.95±0.58 <sup>b</sup>	200.77±2.41 <sup>bc</sup>	24.21±1.04 <sup>c</sup>	0.288±0.014 <sup>abc</sup>	11.884±0.13 <sup>bcd</sup>
T <sub>5</sub>	23.88±1.07 <sup>bc</sup>	200.77±4.17 <sup>cd</sup>	24.01±2.57 <sup>c</sup>	0.310±0.010 <sup>ab</sup>	13.103±1.73 <sup>abc</sup>
T <sub>6</sub>	23.62±0.30 <sup>bc</sup>	182.10±14.55 <sup>d</sup>	23.20±0.37 <sup>c</sup>	0.343±0.007 <sup>ab</sup>	14.780±0.50 <sup>ab</sup>

## 2.8 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs对NaCl胁迫下娃娃菜幼苗叶片AsA-GSH循环关键酶活性的影响

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs对NaCl胁迫下娃娃菜幼苗叶片AsA-GSH循环关键酶活性的影响见表4。NaCl胁迫处理显著增强了叶片APX和MDHAR的活性,较CK<sub>1</sub>分别增加54.67%、50.04%;GR和DHAR的活性则显著降低,较CK<sub>1</sub>分别降低9.4%、17.14%。随着Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs质量浓度的增加,AsA-GSH循环中APX、DHAR和GR活性增强,其中T<sub>6</sub>处理的APX、DHAR和GR活性较CK<sub>2</sub>处理显著增加,分别增加56.64%、18.66%、16.39%;随着Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs处理质量浓度的增加,叶片MDHAR活性降低。

表4 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs对NaCl胁迫下娃娃菜幼苗叶片AsA-GSH循环关键酶活性的影响

Tab.4 Effects of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs on key enzyme activities of AsA-GSH cycle in leaves of Mini Chinese Cabbage seedlings under NaCl stress

处理 Treatments	谷胱甘肽还原酶/ (nmol·min <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> ) GR	脱氢抗坏血酸还原酶/ (nmol·min <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> ) DHAR	单脱氢抗坏血酸还原 酶/(nmol·min <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> ) MDHAR	抗坏血酸过氧化物酶/ (U·g <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> ) APX
CK <sub>1</sub>	603.89±0.74 <sup>ab</sup>	326.97±24.53 <sup>a</sup>	718.78±28.32 <sup>e</sup>	22.67±3.40 <sup>e</sup>
CK <sub>2</sub>	546.72±8.75 <sup>c</sup>	270.91±22.34 <sup>c</sup>	1 564.05±94.96 <sup>a</sup>	50.00±5.35 <sup>d</sup>
T <sub>1</sub>	550.29±11.01 <sup>c</sup>	282.90±9.33 <sup>c</sup>	1 360.37±60.90 <sup>b</sup>	53.33±13.77 <sup>d</sup>
T <sub>2</sub>	555.65±19.73 <sup>c</sup>	287.65±6.54 <sup>bc</sup>	1 151.60±106.87 <sup>c</sup>	63.33±8.50 <sup>bc</sup>
T <sub>3</sub>	571.73±25.27 <sup>bc</sup>	290.78±7.32 <sup>bc</sup>	1 124.26±44.05 <sup>cd</sup>	77.00±6.48 <sup>ab</sup>
T <sub>4</sub>	619.97±22.03 <sup>ab</sup>	319.18±16.38 <sup>ab</sup>	1 046.54±108.83 <sup>cd</sup>	82.33±9.03 <sup>ab</sup>
T <sub>5</sub>	625.33±20.68 <sup>ab</sup>	324.70±9.68 <sup>a</sup>	1 041.72±67.37 <sup>cd</sup>	91.67±10.96 <sup>b</sup>
T <sub>6</sub>	653.92±8.75 <sup>a</sup>	333.07±5.16 <sup>a</sup>	962.39±77.11 <sup>cd</sup>	115.33±7.59 <sup>a</sup>

## 3 讨论与结论

植株生物量、根长、表面积、根尖数、分支数和根冠比等是衡量植株生长状况的直接形态指标<sup>[23]</sup>。植物根系是感受盐胁迫最直接的器官,盐胁迫对根系发育及形态结构建成造成严重影响,燕飞<sup>[24]</sup>的研究表明,盐胁迫严重抑制了黄瓜的根系生长。本研究结果表明,盐胁迫显著抑制娃娃菜幼苗总根长、根表面积、根体积及根尖数,这与高彦强<sup>[25]</sup>在芹菜中的研究结果一致。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs能够进入植物体内,提高植物的养分吸收效率,增加植物的抗氧化能力和光合作用,增强植物的抗病能力,促进植物的生长和发育<sup>[26]</sup>。本研究中,外源喷施Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs有效缓解了盐胁迫对娃娃菜生物量、根长、根表面积、根尖数及根体积的抑制作用。这是因为大量的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs进入娃娃菜中发生氧化还原反应诱导OH自由基从而诱导根系细胞壁松动来增强根的伸长和毛根的发生<sup>[27]</sup>,且随着Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs质量浓度的增加缓解效果越显著,可能是因为随着Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs质量浓度的增加进入植物中的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs增加,从而刺激娃娃菜根系细胞的生长来增加盐胁迫后娃娃菜幼苗根系的生物量、根长、根表面积、根体积。

细胞膜对维持植物细胞微环境和正常代谢具有重要作用,正常情况下,细胞膜具有选择性,而当植物受到逆境胁迫时,细胞膜受到破坏<sup>[28]</sup>。吴艳等<sup>[29]</sup>研究表明,高质量浓度盐环境下,植株体内积累大量Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>,破坏细胞内离子平衡,严重影响细胞膜透性及细胞质酶活性,导致细胞代谢紊乱,积累大量的MDA,致使膜脂过氧化程度加剧。本研究结果表明,盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片MDA含量显著增加,细胞膜结构受到破坏,这与汪娟<sup>[30]</sup>在研究盐胁迫下大白菜的代谢变化和渗透调节中的结果一致。研究表明,纳米颗粒在提高植物对非生物胁迫的耐受性、维持非生物胁迫下植株细胞膜稳态和离子渗透平衡等具有重要作用<sup>[31]</sup>。本研究中,盐胁迫下娃娃菜幼苗叶面喷施Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs能够显著降低MDA含量,这与Rizwan等<sup>[11]</sup>用纳米氧化铁缓解小麦氧化胁迫的研究结果一致。MDA含量随喷施Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs质量浓度的增加而下降,这可能是因为Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs质量浓度的增加能够促进娃娃菜幼苗抗氧化系统发挥作用,有效地减缓了脂质过氧化反应,从而使MDA含量下降<sup>[32]</sup>。

盐胁迫诱导植株叶片积累大量MDA,造成与细胞膜结合的脂肪酸氧化分解,引起膜脂过氧化作用;且高水平的MDA能够导致细胞内部积累过量的O<sub>2</sub><sup>-</sup>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,造成膜系统损伤,引起细胞氧化及细胞内电

解质大量外渗,严重影响组织细胞的微环境和正常代谢<sup>[33]</sup>。本研究中,盐胁迫较对照显著增加了娃娃菜幼苗叶片相对电导率(REC),表明盐胁迫严重损伤娃娃菜幼苗叶片细胞膜,引起细胞内电解质大量外渗,破坏细胞内外渗透压平衡。研究表明,纳米铁能够将非生物胁迫下产生的 ROS 的维持在一定水平,从而减轻因 ROS 过量积累对植物造成的膜脂过氧化,维持细胞膜的完整性。本研究结果表明,外源喷施 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 显著降低了盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片相对电导率(REC),且随着 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 质量浓度的增加,叶片相对电导率(REC)呈降低趋势,这表明 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 可以通过调节细胞内外渗透平衡,维持盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片的细胞膜稳态,保护细胞膜结构和功能的完整性。ROS 的积累量是衡量植物细胞损伤程度的重要指标,同时也反映出植物的耐盐性。本研究中,盐胁迫显著促进了娃娃菜幼苗叶片 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 积累,叶面喷施 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 能够显著降低盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片中 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量,且随着 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 质量浓度的增加 ROS 积累量显著降低,这与 Sarraf 等<sup>[34]</sup>的研究结果一致。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 具有大比表面积特性,随着 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 质量浓度的增大,进入娃娃菜体内的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 能够吸附过量的 Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup>,减轻 NaCl 对娃娃菜幼苗膜透性的破坏,同时参与娃娃菜幼苗细胞中的氧化还原反应进而减少 ROS 的积累,从而缓解娃娃菜叶片膜脂过氧化和细胞损伤程度。

脯氨酸(Pro)作为一种渗透调节物质,参与植物响应非生物胁迫维持细胞渗透平衡,在保护植物免受非生物胁迫损伤方面发挥重要作用<sup>[35]</sup>。不仅能够调节胞质的酸碱度,维持膜蛋白和磷脂结构的稳定,也能够保护质膜的完整性,防止细胞内酶的失活<sup>[36]</sup>。盐胁迫下,植物通过积累 Pro 来提高细胞内渗透压,以维持细胞或组织持水,缓解盐胁迫对植物造成的伤害,提高植物耐盐性。在一定范围内,植物受到胁迫程度越严重,其体内 Pro 含量越高;当胁迫程度减轻时,Pro 的含量也随之降低<sup>[37]</sup>。在本研究中,盐胁迫显著促进了娃娃菜幼苗叶片中 Pro 含量,这与黄程等<sup>[38]</sup>在小白菜盐胁迫中的研究结果一致。Tariq 等<sup>[39]</sup>的研究表明,纳米铁在缓解非生物胁迫中起着重要作用,本研究中外源喷施 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 能够显著降低盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片中 Pro 含量,且随着 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 质量浓度的增加 Pro 含量呈下降趋势,可能是因为在一一定的范围内 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 质量浓度的增加能够不同程度的维持娃娃菜幼苗细胞内渗透压的平衡和组织持水能力,从而缓解盐胁迫造成的伤害,提高耐盐性。

当植物遭受逆境胁迫时,会导致细胞膜脂质过氧化反应增加,进而影响保护酶的活性<sup>[40]</sup>。植物体内 AsA-GSH 循环能够清除活性氧自由基,维持 ROS 平衡,缓解组织细胞过氧化进程<sup>[41]</sup>。AsA-GSH 循环是植物体内重要的抗氧化防御体系,主要通过 AsA、GSH、GSSG、DHA 等抗氧化剂,以及 APX、MDHAR、DHAR、GR、SOD、POD 等抗氧化酶共同作用维持细胞的氧化还原稳态<sup>[42]</sup>。SOD 主要催化 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 生成 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub>,CAT 催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 分解为 H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub>,SOD、CAT 活性升高说明 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 生成能力增强,其分解也在增强<sup>[43]</sup>。在本研究中,盐胁迫促进了娃娃菜幼苗叶片 SOD、POD、CAT、MDHAR 及 APX 活性,这说明娃娃菜幼苗体内的氧化应激机制在起作用。研究表明,AsA-GSH 循环中,小白菜<sup>[42]</sup>、燕麦<sup>[44]</sup>、小麦<sup>[45]</sup>等能够通过调控 AsA-GSH 循环的抗氧化剂含量和关键酶活性来协调植株体内的氧化还原平衡。在本研究中,NaCl 胁迫加剧了娃娃菜幼苗的质膜氧化伤害,叶面喷施不同质量浓度的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 不同程度的增加了盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片 AsA-GSH 循环系统中关键酶 GR、DHAR、APX 的活性,以及抗氧化物质 GSH 含量,增强了娃娃菜幼苗抗氧化能力,有效缓解了盐胁迫对娃娃菜幼苗生长的不利影响。丁继军等<sup>[46]</sup>研究表明,APX 能够将细胞内的 ASA 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 催化为 H<sub>2</sub>O 和脱氢抗坏血酸。郁敏等<sup>[47]</sup>研究表明,APX 和 DHAR 是 AsA-GSH 循环中活性最强的酶,其活性的强弱直接影响 AsA-GSH 循环清除 ROS 的效率。本研究中,应用 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 显著促进了盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片中 APX 和 DHAR 的活性,这在一定程度上清除了 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub><sup>-</sup>,抑制了 ROS 的过量积累,减轻了氧化应激对细胞的损害。这表明 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 能够快速激活 AsA-GSH 循环,提高关键酶活性,维持 AsA-GSH 循环的高速运转,并清除娃娃菜幼苗体内的 ROS 副产物。杜昕等<sup>[48]</sup>研究发现,植物在应对非生物胁迫时体内 AsA、GSSG 及 DHA 含量增加,能够减轻细胞膜损伤。本研究结果表明,盐胁迫显著增加了娃娃菜幼苗叶片关键抗氧化物质 AsA、DHA、GSSH 含量及关键酶 MDHAR、APX 活性,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 处理能够显著增强盐胁迫下娃娃菜幼苗叶片 APX 和 DHAR 活性,表明 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs 能够提升 AsA-GSH 循环中 ROS 清除机制的效率,并增强 AsA-GSH 循环中的保护机制。

综上所述,150 mmol/L NaCl胁迫对娃娃菜幼苗的正常生长产生明显的负效应,外源喷施不同质量浓度(25~500 mg/L)的 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 均能够有效缓解NaCl胁迫的抑制作用,且以500 mg/L的 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NPs}$ 的缓解效果更为明显。

#### 参考文献 References:

- [1] 张昆,李明娜,曹世豪,等.植物盐胁迫下应激调控分子机制研究进展[J].草地学报,2017,25(2):226-235.  
ZHANG K, LI M N, CAO S H, et al. The research advances of molecular mechanisms of plant in responding to salt stress[J]. Journal of grassland science, 2017, 25(2): 226-235.
- [2] 谢志明,玛依努尔·吾斯曼,覃志强,等.盐胁迫对4种甜瓜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].江苏农业科学,2023,51(11):146-152.  
XIE Z M, MAYINUR USMAN, QIN Z Q, et al. Influences of salt stress on seed germination and seedling physiological characteristics of four melon cultivars[J]. Jiangsu agricultural science, 2023, 51(11): 146-152.
- [3] ASSAHA D V, UEDA A, SANEOKA H, et al. The role of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  transporters in salt stress adaptation in glycophytes[J]. Frontiers in physiology, 2017, 8: 509.
- [4] 薛淑媛,朱世东,李雪,等.外源亚精胺对盐胁迫下甜瓜幼苗光合和超微结构的影响[J].江苏农业学报,2013,29(3):613-618.  
XUE S Y, ZHU S D, LI X, et al. Effects of exogenous spermidine on photosynthetic characteristics and ultra structure of salt stressed muskmelon seedlings[J]. Jiangsu agricultural journal, 2013, 29(3): 613-618.
- [5] 张子健,刘美岑,张东,等.盐胁迫对甜瓜幼苗根系生长及膜脂过氧化的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2022,43(2):11-16.  
ZHANG Z J, LIU M C, ZHANG D, et al. Effects of salt stress on root growth and membrane lipid peroxidation of muskmelon seedlings[J]. Journal of Inner Mongolia agricultural university (natural science edition), 2022, 43(2): 11-16.
- [6] WANG J, QIU N, WANG P, et al.  $\text{Na}^+$  compartmentation strategy of Chinese cabbage in response to salt stress[J]. Plant physiology and biochemistry, 2019, 140: 151-157.
- [7] 唐倩倩,张艺凡,和媛,等.磁性纳米材料的生物医学应用进展[J].生物化学与生物物理进展,2019,46(4):353-368.  
TANG Q Q, ZHANG Y F, HE Y, et al. Progress in biomedical applications of magnetic nanomaterials[J]. Progress in biochemistry and biophysics, 2019, 46(4): 353-368.
- [8] 罗宏武.氧化铁纳米材料在废水处理中的应用[J].广东化工,2018,45(20):111-112.  
LUO H W. Application of iron oxide nanomaterials in wastewater treatment[J]. Guangdong chemical industry, 2018, 45(20): 111-112.
- [9] ELANCHEZHIAN R, KUMAR D, RAMESH K, et al. Morpho-physiological and biochemical response of maize (*Zea mays* L.) plants fertilized with nano-iron ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) micronutrient[J]. Journal of plant nutrition, 2017, 40(14): 1969-1977.
- [10] LIU R, ZHANG H, LAL R. Effects of stabilized nanoparticles of copper, zinc, manganese, and iron oxides in low concentrations on lettuce (*Lactuca sativa*) seed germination: nanotoxicants or nanonutrients[J]. Water, air, & soil pollution, 2016, 227: 1-14.
- [11] RIZWAN M, NOUREEN S, ALI S, et al. Influence of biochar amendment and foliar application of iron oxide nanoparticles on growth, photosynthesis, and cadmium accumulation in rice biomass[J]. Journal of soils and sediments, 2019, 19: 3749-3759.
- [12] REN H X, LLU L, LIU C, et al. Physiological investigation of magnetic iron oxide nanoparticles towards Chinese mung bean [J]. Journal biomed nanotechnol, 2011, 7(5): 677-684.
- [13] JEYASUBRAMANIAN K, THOPPEY U U G, HIKKU G S, et al. Enhancement in growth rate and productivity of spinach grown in hydroponics with iron oxide nanoparticles[J]. Rsc advances, 2016, 6(19): 15451-15459.
- [14] MANZOOR N, AHMED T, NOMAN M, et al. Iron oxide nanoparticles ameliorated the cadmium and salinity stresses in wheat plants, facilitating photosynthetic pigments and restricting cadmium uptake [J]. Science of the total environment, 2021, 769: 145221.
- [15] 赵世杰,许长成,邹琦,等.植物组织中丙二醛测定方法的改进[J].植物生理学通讯,1994(3):207-210.  
ZHAO S J, XU C C, ZOU Q, et al. Improvement of determination method of malondialdehyde in plant tissues[J]. Plant physiology newsletter, 1994(3): 207-210.
- [16] 杨建军,张国斌,郁继华,等.盐胁迫下内源NO对黄瓜幼苗活性氧代谢和光合特性的影响[J].中国农业科学,2017,

- 50(19):3778-3788.
- YANG J J, ZHANG G B, YU J H, et al. Effects of endogenous NO on reactive oxygen metabolism and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings under salt stress[J]. China agricultural sciences, 2017, 50(19):3778-3788.
- [17] 陈爱葵, 韩瑞宏, 李东洋, 等. 植物叶片相对电导率测定方法比较研究[J]. 广东教育学院学报, 2010, 30(5):88-91.
- CHEN A K, HAN R H, LI D Y, et al. A comparison of two methods for electrical conductivity about plant leaves[J]. Journal of Guangdong university of education, 2010, 30(5):88-91.
- [18] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- GAO J F. Experimental instruction of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [19] 丁东霞. 外源玉米黄质缓解辣椒幼苗低温弱光胁迫的生理机制[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2022.
- DING D X. Physiological mechanism of exogenous zeaxanthin alleviating low temperature and weak light stress in pepper seedlings[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022.
- [20] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 1996.
- LI H S. Plant physiological and biochemical experiment principle and technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1996.
- [21] 程玉静, 郭世荣, 刘书仁, 等. 外源硝酸钙对盐胁迫下黄瓜幼苗叶片抗氧化系统及膜质子泵活性的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(5):892-898.
- CHENG Y J, GUO S R, LIU S R, et al. Effects of exogenous calcium nitrate on antioxidant system and membrane proton pump activity of cucumber seedlings under salt stress[J]. Journal of ecology, 2010, 29(5):892-898.
- [22] 杨海涛. 不同外源硒对小白菜产量、品质、养分吸收及抗氧化能力的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2021.
- YANG H T. Effects of different exogenous selenium sources on yield, quality, nutrient uptake and antioxidant capacity of Chinese cabbage[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
- [23] 王明睿, 杨升, 刘星, 等. 盐胁迫下植物根系特征及其微生物的互作关系[J]. 世界林业研究, 2023, 36(4):22-27.
- WANG M R, YANG S, LIU X, et al. Characterization of plant roots and their microbial interactions under salt stress[J]. World forestry research, 2023, 36(4):22-27.
- [24] 燕飞. 外源 5-氨基乙酰丙酸(ALA)对盐胁迫下黄瓜幼苗生理调控效应研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2014.
- YAN F. Study on the physiological regulatory effects of exogenous 5-aminolevulinic acid(ALA) on cucumber seedlings under salt stress[D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University, 2014.
- [25] 高彦强. 外源脯氨酸对芹菜盐胁迫的缓解效应[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2023.
- GAO Y Q. Mitigative effect of exogenous proline on celery salt stress[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.
- [26] JIANG M, SONG Y, KANWAR M K, et al. Phytonanotechnology applications in modern agriculture[J]. Journal of nanobiotechnology, 2021(19):1-20.
- [27] KIM J, LEE Y, KIM E, et al. Exposure of iron nanoparticles to *Arabidopsis thaliana* enhances root elongation by triggering cell wall loosening[J]. Environmental science & technology, 2014, 48(6):3477-3485.
- [28] 周军, 武金翠, 杜宝明, 等. 4种藤本植物的抗旱性比较[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(3):674-679.
- ZHOU J, WU J C, DU B M, et al. A comparative study on drought resistances of four species of lianas[J]. Jiangsu journal of agriculture, 2016, 32(3):674-679.
- [29] 吴艳, 沙伟, 马天意. 盐胁迫对大白菜生长发育影响的研究进展[J]. 高师理科学刊, 2021, 41(3):57-59.
- WU Y, SHA W, MA T Y. Research progress on effects of salt stress on growth and development of Chinese cabbage[J]. Journal of higher education, 2021, 41(3):57-59.
- [30] 汪娟. 盐胁迫下大白菜的代谢变化和渗透调节[D]. 曲阜:曲阜师范大学, 2020.
- WANG J. Metabolic changes and osmotic adjustment in Chinese cabbage under salt stress[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2020.
- [31] NAWAZ S, MAQSOOD I, BATOOL F, et al. Improvement of abiotic stress tolerance in plants with the application of nanoparticles[M]//OLIVEIRA M. Abiotic stress in plants-adaptations to climate change, London: Intechopen, 2023.
- [32] 陈烜, 巨吉生, 马麒, 等. FeNPs 对苗期棉花根系生长及其对干旱响应的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(11):49-57.
- CHEN D, JU J S, MA Q, et al. Effects of FeNPs on cotton roots growth and its response to drought stress at seedling stage[J]. Journal of agricultural science and technology, 2023, 25(11):49-57.
- [33] 杜玉玲. 外源水杨酸对盐胁迫下唐古特白刺 ROS 代谢及 AsA-GSH 循环的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2017.

- DU Y L.Effects of exogenous salicylic acid on ROS metabolism and AsA-GSH cycle in Tangut white spurge under salt stress [D].Harbin:Northeast Agricultural University,2017.
- [34] SARRAF M, VISHWAKARMA K, KUMAR V, et al.Metal/metalloid-based nanomaterials for plant abiotic stress tolerance: an overview of the mechanisms[J].Plants,2022,11:316.
- [35] 张林,陈翔,吴宇,等.脯氨酸在植物抗逆中的研究进展[J].江汉大学学报(自然科学版),2023,51(1):42-51.  
ZHANG L, CHEN X, WU Y, et al.Research progress of proline in plant stress resistance[J].Journal of Jiangnan university (natural science edition),2023,51(1):42-51.
- [36] 付珊,雷婷,金苇,等.盐胁迫对番茄幼苗生长及生理指标的影响[J].湖北师范大学学报(自然科学版),2023,43(3):9-15.  
FU S, LEI T, JIN W, et al.Effects of salt stress on growth and physiological indexes of tomato seedlings[J].Journal of Hubei normal university(natural science edition),2023,43(3):9-15.
- [37] 刘霜,洪丕征,张宏,等. $\gamma$ -聚谷氨酸对盐胁迫下小白菜生长及抗氧化特性的影响[J].山东农业科学,2022,54(1):44-48.  
LIU S, HONG P Z, ZHANG H, et al.Effects of  $\gamma$ -polyglutamic acid on growth and antioxidant properties of pakchoi under salt stress[J].Shandong agricultural science,2022,54(1):44-48.
- [38] 黄程,文小梅,唐殷,等.外源水杨酸对盐胁迫下小白菜幼苗生理的影响[J].江苏农业科学,2020,48(7):147-151.  
HUANG C, WEN X M, TANG Y, et al.Influence of exogenous salicylic acid on physiology of Chinese cabbage seedlings under salt stress[J].Jiangsu agricultural science,2020,48(7):147-151.
- [39] TARIQ M, CHOUDHARY S, SINGH H, et al.Role of nanoparticles in abiotic stress [M]//AHMAD F, SULTAN M.Technology in agriculture.London: Intechopen,2021:323.
- [40] 潘晶,黄翠华,罗君,等.盐胁迫对植物的影响及 AMF 提高植物耐盐性的机制[J].地球科学进展,2018,33(4):361.  
PAN J, HUANG C H, LUO J, et al.Effects of salt stress on plant and the mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi enhancing salt tolerance of plants[J].Advances in earth science,2018,33(4):361.
- [41] 孙军利,赵宝龙,郁松林.SA对高温胁迫下葡萄幼苗 AsA-GSH 循环的影响[J].核农学报,2015,29(4):799-804.  
SUN J L, ZHAO B L, YU S L.Effects of exogenous salicylic acid(SA) on ascorbate glutathione cycle(AsA-GSH) circulation metabolism in grape seedlings under high temperature stress[J].Acta journal of nuclear agriculture,2015,29(4):799-804.
- [42] 赵肖琼,梁泰帅,张恒慧.Spd对NaCl胁迫下小白菜幼苗生长、AsA-GSH循环及氮代谢的影响[J].中国瓜菜,2022,35(4):51-55.  
ZHAO X Q, LIANG T S, ZHANG H H.Effect of spermidine on the growth, AsA-GSH cycle and nitrogen metabolism of *Brassica chinensis* L. seedlings under NaCl stress[J].China cucurbit,2022,35(4):51-55.
- [43] SHINGAKI-WELLS R N, HUANG S, TAYLOR N L, et al.Differential molecular responses of rice and wheat coleoptiles to anoxia reveal novel metabolic adaptations in amino acid metabolism for tissue tolerance [J].Plant physiol,2011,156(4):1706-1724.
- [44] 夏方山.不同老化处理对燕麦种子线粒体结构及抗氧化系统的影响[D].北京:中国农业大学,2015.  
XIA F S.Effects of different aging treatments on mitochondrial structure and antioxidant system of oat seeds [D].Beijing:China Agricultural University,2015.
- [45] RIZWAN M, ALI S, ALI B, et al.Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat[J].Chemosphere,2019,214:269-277.
- [46] 丁继军,潘远智,李丽,等.外源谷胱甘肽对石竹幼苗镉毒害的缓解效应[J].植物生态学报,2013,37(10):950-960.  
DING J J, PAN Y Z, LI L, et al.Mitigation effects of exogenous glutathione on the growth of *Dianthus chinensis* seedlings under Cd stress[J].Journal of plant ecology.2013,37(10):950-960.
- [47] 郁敏,任亚萍,米银法,等.根际低氧对不同抗性牡丹植株 AsA-GSH 循环代谢的影响[J].北方园艺,2016(16):69-75.  
YU M, REN Y P, MI Y F, et al.Effect of root zone hypoxia stress on AsA-GSH between two peony varieties[J].Northern horticulture,2016(16):69-75.
- [48] 杜昕,李博,毛鲁泉,等.褪黑素对干旱胁迫下大豆产量及 AsA-GSH 循环的影响[J].作物杂志,2022(1):174-178.  
DU X, LI B, MAO L X, et al.Effects of melatonin on yield and AsA-GSH cycle in soybean under drought stress[J].Crop journal,2022(1):174-178.